

Inhaltsverzeichnis

Teil I	Anwendung der Finite-Element-Methode (FEM) in der Praxis	1
	Lernziel	1
1	Die Erfolgs-Story der Finite-Element-Methode	2
1.1	Situation der Produktentwicklung	2
1.2	Methoden der Produktentwicklung	3
1.3	Vor 1960: Entstehung der Idee der Finite-Element-Methode	4
1.4	1960... Die ersten elektronischen Rechenhilfen	5
1.5	1970... FEM-Simulationen für sicherheitsrelevante Bauteile	6
1.6	1980... Verbreitung der FEM in ausgewählten Bereichen	6
1.7	1990... Rasante Verbreitung der Anwendungsgebiete	7
1.8	2000... Simulation von Prozessketten	20
1.9	2010... Trends der Finite-Element-Methode	25
2	Grundidee der Finite-Element-Methode	26
2.1	Rechnerische Simulation	26
2.2	Die Finite-Element-Methode (FEM)	27
2.3	Berechnung komplexer Geometrien mit FEM	36
2.4	Weitere Anwendungsmöglichkeiten der FEM	37
2.5	Entwicklungstrends	43
3	Einführung der FEM im Betrieb	46
3.1	Vorgehensweise, Anforderungen, Kosten	46
3.2	Anforderungen an den Anwender	47
3.3	Anforderungen an Software, Kosten	47
3.4	Anforderungen an Hardware, Kosten	48
3.5	Auswahlkriterien für ein FEM-Programm	49
3.6	Endauswahl	51
3.7	Übersicht über FEM-Programme	51
3.8	Qualitätsmanagement und FEM-Berechnungen	53
	Literaturangaben	56

Teil II	Einführung in die Theorie der FEM	59
Lernziel		59
1	Ausführliche Beschreibung der Methode anhand eines einfachen nachvollziehbaren Beispiels	60
1.1	Beschreibung des Beispiels	60
1.2	Analytische Lösung	61
1.3	Lösung nach der Finite-Element-Methode	64
1.4	Steigerung der Genauigkeit der Ergebnisse	76
1.5	Konvergenzbetrachtung	97
2	Ergänzende Betrachtungen	102
2.1	Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie	102
2.2	Ingenieurmäßige Deutung der Elementsteifigkeitsmatrix und der Gesamtsteifigkeitsmatrix	103
2.3	Berücksichtigung von Elementbelastungen	109
2.4	Beliebige Lage der Elemente	114
3	Die Steifigkeitsmatrix des Balkenelementes	122
4	Die Steifigkeitsmatrix des Scheibenelementes	127
4.1	Herleitung der Steifigkeitsmatrix für ein Element, das parallel zu den globalen Achsen ausgerichtet ist	127
4.2	Allgemeines (isoparametrisches) Scheibenelement	130
4.3	Lösung des Beispiels aus 1.3 mit zwei Scheibenelementen	135
5	Einige Standardelemente für die Strukturmechanik	139
5.1	Fachwerkelement in der Ebene x,y ANSYS LINK1 (truss)	140
5.2	Balkenelement in der Ebene x,y ANSYS BEAM3 (beam)	141
5.3	Schalenelement im Raum ANSYS SHELL63 (shell)	142
5.4	Membranelement im Raum ANSYS SHELL63 Keyopt(1)=1 (shell, membrane option)	144
5.5	Plattenelement im Raum ANSYS SHELL63 Keyopt(1)=2 (shell, plate option)	145
5.6	Scheibenelement in der Ebene x,y ANSYS PLANE42 ebener Spannungszustand Keyopt(3)=0 oder 3 (2-d solid, plane stress option)	146
5.7	Rotationssymmetrisches Element ANSYS PLANE42 Keyopt(3)=1 (2-d solid, axisymmetric option)	148
5.8	Scheibenelement in der Ebene x,y ANSYS PLANE42 ebener Dehnungszustand Keyopt(3)=2 (2-d solid, plain strain option)	149
5.9	Volumenelement ANSYS SOLID45 (3-D solid)	150
5.10	Dreieck-, Tetraeder-, Prismaelemente	151
5.11	Elemente mit Zwischenknoten	152
5.12	Verbesserte Elemente ohne Zwischenknoten	152
6	FEM für nichtlineare Statik, Strukturmechanik, Temperaturfelder, elektrostatische Felder, Magnetfelder, Fluidmechanik	153
6.1	Nichtlineare Statik	153
6.2	Strukturmechanik	154
6.3	Temperaturfelder	156
6.4	Analoge Feldprobleme	157
6.5	Magnetfeld	158
6.6	Fluidmechanik	159
6.7	Gekoppelte Felder (Multiphysik)	159
7	Gleichungsauflösung	160
7.1	Direkte Verfahren	160
7.2	Iterative Verfahren	165
7.3	Reduktionsverfahren	166
Literaturangaben		168

Teil III Handhabung des ANSYS/ED-Programms	169
Lernziel	169
1 Einführung	169
2 Fallbeispiele der Idealisierung	171
3 Möglichkeiten des ANSYS/ED-Programms	181
3.1 Das ANSYS/ED-Programm	182
3.2 Das ANSYS/ED/WORKBENCH-Programm	185
3.3 Hardware-Voraussetzungen.....	187
3.4 Begrenzungen des ANSYS/ED-Programms	188
4 Ablauf einer ANSYS/ED-Analyse	190
4.1 Installation des ANSYS/ED-Programms	190
4.2 Aufruf des ANSYS/ED-Programms	190
4.3 Arbeitsschritte bei der Anwendung des FEM-Programms	190
4.4 Sonstige Hinweise zur Idealisierung	209
5 Anwendungsgebiete des ANSYS/ED-Programms	212
5.1 Strukturanalysen.....	212
5.2 Temperaturfeldanalysen.....	226
5.3 Magnetfeldberechnungen.....	229
5.4 Berechnung elektrischer Felder	230
5.5 Fluidanalysen	231
5.6 Analyse gekoppelter Felder.....	233
6 Modellgenerierung	236
6.1 Überblick über die Modellgenerierung.....	236
6.2 Planung der Vorgehensweise	238
6.3 Koordinatensysteme.....	244
6.4 Die Arbeitsebene (working plane)	251
6.5 Solid-Modeling.....	253
7 Die Vernetzung des Geometriemodells	277
7.1 Wie Sie Ihr Geometriemodell vernetzen.....	277
7.2 Verändern des Netzes.....	287
7.3 Einige Hinweise und Warnungen	287
7.4 Verändern des Geometriemodells.....	288
7.5 Das Cross-Reference-Checking des Geometriemodells.....	292
7.6 Direkte Modellgenerierung	294
7.7 Modelle für Rohrleitungssysteme	297
7.8 Steuerung der automatischen Nummernzuweisung	302
7.9 Koppelung von Freiheitsgraden (coupling) und Bindungsgleichungen (constraint equations).....	303
7.10 Das Archivieren des Modells.....	305
8 Belastung und Lösungsphase (solution)	307
8.1 Belastung des Modells	307
8.2 Lösungsphase (solution)	324
9 Postprocessing	329
9.1 Was ist Postprocessing	329
9.2 Die Ergebnisdateien	330
9.3 Arten von Daten, die für das Postprocessing verfügbar sind	330
9.4 Der allgemeine Postprocessor (Main Menu> General Postproc, [/POST1])	331
9.5 Der Postprocessor für den Zeitbereich (POST26)	343

10	Grafik	350
10.1	Ein Überblick über Grafik.....	350
10.2	Erzeugen von Geometriedarstellungen	351
10.3	Generieren von geometrischen Ergebnisdarstellungen	355
10.4	Erzeugen von Diagrammen.....	360
10.5	Allgemeine Eingaben zum Steuern und Ausführen von Grafik	363
10.6	Externe Grafik.....	367
11	Selektieren	370
12	ANSYS Parametersprache (Parametric Design Language, APDL)	374
12.1	Was ist APDL?	374
12.2	Parameter	374
12.3	Macros	378
12.4	Wiederholungen, Verzweigungen, Schleifen	380
13	Aus der Erfahrung	384
13.1	Positiv definite Materialdaten.....	384
13.2	Schraubenmodellierung und Schraubenvorspannung	385
13.3	Inhomogenitäten, Fügestellen	389
13.4	Nichtlineare Berechnungen	393
13.5	Spannungsbewertung	394
13.6	Grafische Ergebnisdarstellung	397
13.7	Mittelung der Spannungsdarstellung.....	398
14	ANSYS/WORKBENCH	400
14.1	Modellerstellung	401
14.2	Lastaufbringung.....	402
14.3	Vernetzung	402
14.4	Lösung.....	403
	Literaturangaben.....	404

Teil IV Beispiele	405
Lernziel	405
1 Die Benutzeroberfläche des ANSYS/ED-Programms	405
2 Die Benutzeroberfläche des ANSYS/Workbench-Programms	412
Einführungsbeispiele	
Beispiel 1 2-D Einarbeitung (Strukturmechanik)	420
Beispiel 2 3-D Einarbeitung (Strukturmechanik)	445
Grundlagenbeispiele	
Beispiel 3 Zugstab aus Teil II (Theorie der Strukturmechanik)	476
Beispiel 4 Scheibe mit Loch (Vernetzungstechnik)	494
Beispiel 5 Kragbalken (Elementauswahl in der Strukturmechanik).....	520
Beispiel 6 Winkelhalterung (Geometriemodellierung)	533
Beispiel 7 Schalentragerwerk (Postprocessing).....	543
Beispiele zu besonderen Möglichkeiten des ANSYS/ED-Programms	
Beispiel 8 Submodelltechnik (Gekerbter Zugstab)	553
Beispiel 9 Kontaktelemente, Hyperelastizität, Plastizität (Gummidichtung, Umformung)	563
Beispiel 10 Viskoelastizität (Pendelstütze aus Kunststoff)	583
Beispiel 11 Modalanalyse (Stimmgabel)	593
Beispiel 12 Schwingung einer Fahrzeugachse (Reduzierte Transiente Dynamik, Frequenzganganalyse)	611
Beispiel 13 Temperaturfeld (3-D Einarbeitung)	622
Beispiel 14 Magnetfeld (3-D Einarbeitung).....	635
Beispiel 15 Fluidodynamik (3-D Einarbeitung)	649
Beispiel 16 Elektrisches Feld (Koaxialkabel).....	666
Beispiel 17 Temperatur-Struktur-Kontakt (Rohr auf ebener Unterlage)	680
Beispiele aus der Technik	
Beispiel 18 Tellerfeder (Geometrische Nichtlinearität)	687
Beispiel 19 Dickwandiger Druckbehälter (Rotationssymmetrie, Plastizität)	699
Beispiel 20 Betonträger (Betonmaterial)	719
Beispiel 21 Rotorwelle mit Zahnrad (Modalanalyse mit Kreiselwirkung).....	729
Beispiel 22 Seilbruch an einer Schrägseilbrücke (Transiente Dynamik).....	735
Beispiel 23 Plattenfedermembran (Optimierung)	745
Beispiel 24 Kühlturm (Schalenelemente, APDL, Koordinatensysteme).....	756
Beispiel 25 Lötbugel (Multiphysik, Kopplung von elektrischem Feld, Wärmeübertragung und Strukturmechanik).....	767
Literaturangaben.....	776
Anhänge	
Anhang A Maßeinheiten und Umrechnungsfaktoren	777
Anhang B Englisch-deutsche Fachbegriffe.....	784
Anhang C Kommandoliste	796
Sachregister	803